

令和元年5月20日現在

機関番号：11301

研究種目：基盤研究(A)（一般）

研究期間：2016～2018

課題番号：16H02137

研究課題名（和文）災害リスク評価のためのマルチステージ破壊シミュレーション手法の開発

研究課題名（英文）Method of multistage failure simulation for disaster risk evaluation

研究代表者

寺田 賢二郎（Terada, Kenjiro）

東北大学・災害科学国際研究所・教授

研究者番号：40282678

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 32,200,000円

研究成果の概要（和文）：本研究では、脆性材料により構成される構造物の崩壊現象の再現を意図して、連続体の変形と剛体運動を分離した共回転定式化を、mid-pointアルゴリズムおよびenergy-momentum法を用いて動的問題へと発展させた。さらにはpenalty法による要素の結合・分離により破壊現象を表現し、augmented Lagrange法を用いて接触現象を考慮したマルチステージ破壊シミュレーション手法を構築した。数値解析により提案手法の妥当性を例示した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

大きな負荷履歴に起因する剛性・強度などの材料劣化、発災時のひび割れ生成と成長、応力伝達メカニズムの変化を経て部分的平衡から構造物の大変位・大回転運動が進展し、全体的な崩壊に至る過程をシームレスに数値シミュレーションにより再現するには、解決すべき多くの理論的および技術的課題があり、世界的にみても未だ決定的な手法が確立されていない。また、成果物として得られた破壊のシミュレーション手法は健全な構造物が崩壊していく過程を連続的に再現できる、世界的にも比例ないものである。

研究成果の概要（英文）：Based on the co-rotational formulation to deal with large displacements and rotations of a solid, we propose a method of multi-stage failure simulation of brittle materials and structures involving dynamic frictional-contact behavior. In order to simulate dynamic behavior of the structure, we adopted mid-point algorithm along with energy-momentum method. Also, we employed the penalty method to represent the brittle fracture due to gluing/separation of the elements, and the augmented Lagrange method to consider the frictional contact effects. Verification tests were conducted for the formulation with a simple structure subjected to the large displacements and rotations. Also, some simple numerical examples were presented to demonstrate the capability of the proposed method to simulate the multi-stage failure process.

研究分野：総合理工

キーワード：破壊シミュレーション 逐次破壊モデル 結合力モデル 災害リスク評価 損傷モデル 断層破壊 地盤変状

様式 C-19、F-19-1、Z-19、CK-19（共通）

1. 研究開始当初の背景

東北地方太平洋沖地震のような巨大地震に見舞われた構造物は、崩壊までは至らないにせよ、何らかの損傷を受け、設計・施工時に保持されていた強度・耐荷力を保持していない可能性がある。実際、我が国の耐震設計技術は非常に高度化し、完成の域に近いといっても過言ではない。しかし、大きな揺れを経験したり、経年的な劣化を受けたりした構造物が、現状どのような強度を有していて、今後発生する災害ハザードに対してどの程度の耐荷力を発揮するのか、発揮できないとしたらどのような過程を経て崩壊し、終局状態を迎えるのかについて予測・評価するための方法論は確立されていない。すなわち、荷重履歴あるいは経年性に起因する材料劣化を加味したうえで、構造物が発災時に部分的破壊、そして全体的崩壊に至る過程を精緻に再現する数値シミュレーション技術の構築はニュートン力学を基調とする計算科学の課題の一つとして認識されている。

2. 研究の目的

本研究の目的は、数値解析に基づく災害リスク評価の精度向上を意図して、東北地方太平洋沖地震などの大きな負荷履歴に起因する剛性・強度の低下などの材料劣化、発災時のひび割れ生成と成長、応力伝達メカニズムの変化を経て崩壊に至る過程をマルチステージ破壊現象と定義し、これを複数の段階（ステージ）に分け、各ステージの現象の再現に実績があり信頼性の高い解析手法を適用してこれらをシームレスに繋ぎ、より確度の高い災害リスク評価に資する手法を構築することである。

3. 研究の方法

上記で説明したステージをシームレスに結合して精緻に解析するためには地震作用や構造物が崩壊するときの大変位・大回転運動を考えた動的問題、破壊や接触などの複雑な現象の定式化が必要となる。そこで、本研究では構造物が崩壊するときの大変位・大回転運動を共回転定式化¹⁾に基づいて表現し、Energy-momentum 法²⁾および Mid-point アルゴリズム³⁾に基づいて動的問題へと発展させる。そして、破壊を表現するためにペナルティ法を用いた要素間の結合・分離の定式化を行い、Node-to-surface 法を用いて接触問題の定式化を行う。

4. 研究成果

(1) 動的問題に拡張した共回転定式化による大変位・大回転運動の定式化

本節では、物体の運動を剛体運動と連続体の変形に分離した Moita & Crisfield¹⁾の共回転定式化を動的に問題に発展させる。地震作用や崩壊を考えた非常に長い時間スケールの動的問題を扱う場合は陰解法が適しているが、幾何学的非線形性が優位になるような動的問題に対して標準的な Newmark の β - γ 法はしばしば不安定性が問題となる。そこで、比較的大きな時間ステップでも安定した解析が可能な Energy-momentum 法および Mid-point アルゴリズムに基づいて共回転定式化を動的問題に発展させる。Energy-momentum 法は Simo & Tarnow²⁾が提案したエネルギーと運動量が保存可能な時間積分法である。一方、Mid-point アルゴリズムは Crisfield³⁾がエネルギーおよび運動量保存の考え方を共回転定式化に導入した手法であり、3次元の梁要素については定式化されている。本研究では3次元の連続体要素を用いて動的問題を扱うため次式のようになる。

$$\left[\frac{2}{\Delta t^2} \mathbf{M} + \left(\frac{\mathbf{T}_{n+1} + \mathbf{T}_n}{2} \right) \frac{1}{2} \bar{\mathbf{K}} \mathbf{T}_{n+1} + \frac{1}{2} \mathbf{K}_m^{tG} \right] \Delta \mathbf{d}_{n+1} = -(\mathbf{F}_m^{\text{mas}} + \mathbf{F}_m^{\text{int}} - \mathbf{F}_m^{\text{ext}})$$

ここに、 Δt は時間刻み、下付きの添え字 n 、 $n+1$ は時刻を示す。 \mathbf{M} は整合質量行列、 \mathbf{K}_m^{tG} 、 $\mathbf{F}_m^{\text{mas}}$ 、 $\mathbf{F}_m^{\text{int}}$ 、 $\mathbf{F}_m^{\text{ext}}$ はそれぞれ Mid-point アルゴリズムに基づく幾何剛性行列、慣性力ベクトル、内力ベクトル、外力ベクトルである。

(2) き裂の発生・進展解析のための不連続面の定式化

物体に発生するひび割れを正確に表現するためにはメッシュに依存しないような解析手法が必要となるが、任意方向のひび割れの発生・進展解析手法はアルゴリズムが非常に複雑になる。本研究では、比較的簡単に破壊現象を表現するために、物体間に潜在的な不連続面を設け、破壊の発生判定後は分離させる方法を採用。ここで、結合の方法にはペナルティ法を採用する。いま、動的問題の定式化には Energy-momentum 法を用いるため次式のような法線方向のギャップ \dot{g}_{N_m} と接線方向のギャップ $\dot{g}_{T_m}^\alpha$ を定義する。

$$\begin{aligned} \dot{g}_{N_m} &= -[(\mathbf{x}_{n+1}^{(2)} - \mathbf{x}_{n+1}^{(1)}) - (\mathbf{x}_n^{(2)} - \mathbf{x}_n^{(1)})] \cdot \mathbf{v}_m \\ \dot{g}_{T_m}^\alpha &= -[(\mathbf{x}_{n+1}^{(2)} - \mathbf{x}_{n+1}^{(1)}) - (\mathbf{x}_n^{(2)} - \mathbf{x}_n^{(1)})] \cdot \boldsymbol{\chi}_m^\alpha \end{aligned}$$

ここに、上付きの括弧数字は潜在的なひび割れ面をもつ隣り合う物体に属する変数であり、 \mathbf{v}_m と $\boldsymbol{\chi}_m^\alpha$ はそれぞれ不連続面上の埋め込み座標の法線ベクトル、反変基底である。このギャップ関数を用いて脆性材料の破壊現象を再現するための表面力-開口変位関係を次式のように定義する。

$$\begin{aligned} \hat{\mathbf{t}}_N &\equiv \epsilon_N \dot{g}_{N_m}; \quad \hat{\mathbf{t}}_{T_\alpha} \equiv \epsilon_T g_{\alpha\beta m} \dot{g}_{T_m}^\beta \quad (\text{before separation}) \\ \hat{\mathbf{t}}_N &\equiv 0; \quad \hat{\mathbf{t}}_{T_\alpha} \equiv 0 \quad (\text{after separation}) \end{aligned}$$

この法線方向の結合力 \hat{t}_N と接線方向の結合力 \hat{t}_{T_α} より不連続面の結合・分離による内力ベクトル $\mathbf{F}_m^{\text{dis}}$ と接線剛性行列 \mathbf{K}_m^{tD} を求めることができる。

$$\mathbf{F}_m^{\text{dis}} = \int_{\Gamma_d} (\hat{t}_N \hat{\mathbf{N}}_m - \hat{t}_{T_1} \hat{\mathbf{D}}_m^1 - \hat{t}_{T_2} \hat{\mathbf{D}}_m^2) dA; \quad \mathbf{K}_m^{\text{tD}} = \int_{\Gamma_d} [2\epsilon_N \hat{\mathbf{N}}_m \hat{\mathbf{N}}_m^T + 2\epsilon_T g_{\alpha\beta} \hat{\mathbf{D}}_m^\alpha \hat{\mathbf{D}}_m^\beta]^T dA$$

(3) Augmented Lagrange 法による接触問題の定式化

有限要素法で接触問題を扱うときの離散化の方法としてNode-to-surface法(NTS法)とmortar法がある⁴⁾。接触しあう物体においてNTS法は節点と要素表面で、mortar法はインターフェイスとして接触要素を定義する。本研究では対象とする接触現象の特徴からNTS法を採用し、Armero & Petocz⁵⁾を参考にEnergy-momentum法での定式化を行う。いま、NTS法で離散化するために要素表面で接触する物体の現在配置を \mathbf{x}^1 、節点で接触する物体の現在配置を \mathbf{x}^2 とすると、節点が要素表面に射影される点 $\tilde{\mathbf{x}}^1 = \mathbf{x}^1(\xi^1, \xi^2)$ は次式に示す方程式を解くことによって求めることができる。

$$(\mathbf{x}^2 - \mathbf{x}^1(\xi^1, \xi^2)) \cdot \frac{\partial \mathbf{x}^1(\xi^1, \xi^2)}{\partial \xi^\alpha} = 0$$

求めた射影点 $\tilde{\mathbf{x}}^1$ と節点 \mathbf{x}^2 からEnergy-momentum法における動的な法線方向のギャップ \dot{g}_m を計算することができる。

$$\dot{g}_m \equiv -[(\mathbf{x}_{n+1}^2 - \tilde{\mathbf{x}}_{n+1}^1) - (\mathbf{x}_n^2 - \tilde{\mathbf{x}}_n^1)] \cdot \tilde{\mathbf{n}}_m^1$$

ここに、 $\tilde{\mathbf{n}}_m^1$ は射影点での要素表面に対する法線ベクトルである。

次に接触における制約付き最適化問題の解法について説明する。本研究では動的問題の定式化に陰解法であるEnergy-momentum法を採用するため時間刻みの値を大きくできる。しかしながら、時間刻みが大きくなると貫入を許容するペナルティ法では貫入量も大きくなるため接触問題を正確に解くことはできない。そこで本研究では、ペナルティ法で生じた貫入を修正するAugmented Lagrange法を採用する。いま、法線方向の接触力 t_N と接線方向の接触力 t_{T_α} は次式のように与えられる。

$$t_N^{(k)} \equiv (\bar{\lambda}_N^{(k)} + \epsilon_N \langle \dot{g}_m^{(k)} \rangle_+)_+; \quad t_{T_\alpha}^{\text{trial}(k)} = \bar{\lambda}_{T_\alpha}^{(k)} + \epsilon_T m_{\alpha\beta m} (\xi_m^{\beta(k)} - \bar{\xi}^\beta)$$

ここに、上付きの添え字 (k) はUzawaアルゴリズムにおける反復回数、 $\bar{\lambda}_N$ 、 $\bar{\lambda}_{T_\alpha}$ はそれぞれ法線方向、接線方向のLagrange未定乗数、 $m_{\alpha\beta m}$ は軽量テンソル、 ξ_m^β は β 方向の付着点であり、上付きの文字 trial はリターンマッピング法における試行状態を意味する。接線方向接触力 t_{T_α} はすべり関数 Φ を

$$\Phi^{\text{trial}} = \|\mathbf{t}_T^{\text{trial}(k)}\| - \mu t_N^{(k)}$$

とすると、次式のように与えられる。

$$t_{T_\alpha}^{(k)} = \begin{cases} t_{T_\alpha}^{\text{trial}(k)} & \text{if } \Phi^{\text{trial}} \leq 0 \text{ (stick)} \\ \mu t_N^{(k)} \frac{t_{T_\alpha}^{\text{trial}(k)}}{\|\mathbf{t}_T^{\text{trial}(k)}\|} & \text{otherwise (slip)} \end{cases}$$

この修正した接線方向接触力 t_{T_α} と法線方向の接触力 t_N から接触による内力ベクトル $\mathbf{F}_m^{\text{con}}$ と接線剛性行列 \mathbf{K}_m^{tC} を計算することができる。以上より、(2)、(3)節で求めた内力ベクトルと接線剛性行列を(1)節の方程式に加えることにより、本研究で提案する線形化方程式は次式ようになる。

$$\begin{aligned} & \left[\frac{2}{\Delta t^2} \mathbf{M} + \left(\frac{\mathbf{T}_{n+1} + \mathbf{T}_n}{2} \right) \frac{1}{2} \bar{\mathbf{K}} \mathbf{T}_{n+1} + \frac{1}{2} \mathbf{K}_m^{\text{tG}} + \frac{1}{2} \mathbf{K}_m^{\text{tD}} + \frac{1}{2} \mathbf{K}_m^{\text{tC}} \right] \Delta \mathbf{d}_{n+1} \\ & = -(\mathbf{F}_m^{\text{mas}} + \mathbf{F}_m^{\text{int}} + \mathbf{F}_m^{\text{dis}} + \mathbf{F}_m^{\text{con}} - \mathbf{F}_m^{\text{ext}}) \end{aligned}$$

(4) 不連続性岩盤斜面の崩壊解析

提案手法が摩擦を考慮した接触を含む大回転運動を表現可能か検証するため、不連続性岩盤斜面の数値解析を行う。図1に示すような潜在的な不連続面を有する岩盤斜面においてモデルの底面から地震動を入力してその挙動を確認した。ここで入力する地震動は平成28年熊本地震の地震動であり、観測された加速度の時刻歴を高速Fourier変換により変位の時刻歴に変換して入力した。図2は本解析により得られた変形図と最大主応力分布の時刻歴であり、結合するそれぞれのブロックが地震動による励振により分離してすべり始めている。このように、本解析手法は破壊や接触を伴う構造物の大回転運動を適切に表現できることがわかる。

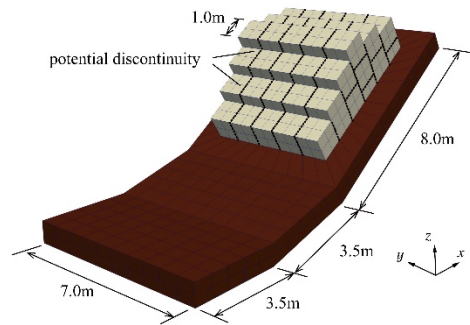


図1 不連続性岩盤斜面の幾何形状
と有限要素メッシュ

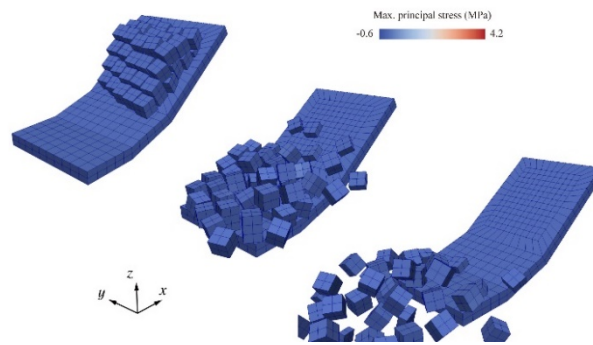


図2 変形図と最大主応力分布の時刻歴

(5) まとめ

構造物の崩壊現象の再現には、比較的長い時間スケールのもと、ひび割れの進展や接触などの複雑な挙動に加えて構造物の大変位・大回転運動を併せた定式化が必要となる。本研究では、大変位・大回転運動のための共回転定式化を、安定的に解析できるように Energy-momentum 法および Mid-point アルゴリズムに基づいて動的問題へと発展させ、さらにはひび割れの発生・進展のためのペナルティ法と接触のための Augmented Lagrange 法を組み合わせることにより、複数の現象をシームレスに結合したマルチステージ破壊シミュレーション手法を提案した。そして、数値解析例からひび割れを伴う構造物の動的接触・大回転運動を適切に表現できることを例示し、本手法の妥当性を検証した。

参考文献

- ① G. F. Moita and M. A. Crisfield, A finite element formulation for 3-D continua using the co-rotational technique, *Int. J. Numer. Methods Engrg.*, Vol. 39, 1996, pp. 3775-3792
- ② J. C. Simo and N. Tarnow, The discrete energy-momentum method. Conserving algorithms for non-linear elastodynamics, *Z. Agnew. Math. Phys.*, Vol. 43, 1992, pp. 757-792
- ③ M. A. Crisfield, U. Galvanetto and G. Jelenić, Dynamics of 3-D co-rotational beams, *Comput. Mech.*, Vol. 20, 1997, pp. 507-519
- ④ T. A. Laursen, *Computational Contact and Impact Mechanics: Fundamentals of Modeling Interfacial Phenomena in Nonlinear Finite Element Analysis*, Springer, 2002
- ⑤ F. Armero and E. Petocz, Formulation and analysis of conserving algorithms for frictionless dynamic contact/impact problems, *Comput. Methods Appl. Engrg.*, Vol. 158, 1998, pp. 269-300

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計4件)

- ① K. Yamaguchi, N. Takeuchi and E. Hamasaki, Three-dimensional simplified slope stability analysis by hybrid-type penalty method, *Geomechanics and Engineering*, 査読有, Vol. 15, 2018, pp. 947-955
DOI: 10.1080/19386362.2018.1465743
- ② 相馬 悠人, 車谷 麻緒, 摩擦接触を考慮した損傷モデルによる準脆性材料の破壊シミュレーション, *土木学会論文集 A2 (応用力学)*, 査読有, Vol. 74, 2018, pp. I_233-I_241
DOI: 10.11421/jsces.2017.20170011
- ③ 山口 裕矢, 高瀬 慎介, 森口 周二, 寺田 賢二郎, 小田 憲一, 上石 勲, 非ニュートンモデルを用いた雪崩の3次元非構造有限要素解析, *日本計算工学会論文集*, 査読有, Vol. 20170011, 2017
DOI: 10.11421/jsces.2017.20170011
- ④ 大川 真里奈, 鈴木 峻, 高瀬 慎介, 森口 周二, 寺田 賢二郎, 車谷 麻緒, 有限ひずみ損傷モデルを用いた断層の動きに伴う表層地盤変状解析, *土木学会論文集 A2 (応用力学)*, 査読有, Vol. 73, 2017, pp. I_497-I_505
DOI: 10.2208/jscejam.73.I_497

〔学会発表〕(計10件)

- ① 副島 克哉, 新宅 勇一, 堤 成一郎, 寺田 賢二郎, 移動硬化を考慮した結合力理込型弾塑性損傷モデルによる構造用鋼材の耐久性評価, 日本機械学会第31回計算力学講演会, 徳島大学 常三島キャンパス, 徳島, 2018年11月23日~25日
- ② M. Okawa, S. Suzuki, K. Terada, S. Moriguchi and S. Toda, Numerical simulations

- of ground movement due to surface earthquake fault, 7th Asia Conference on Earthquake Engineering (7ACEE), Sheraton Grande Sukhumvit, Bangkok, Thailand, November 22-24, 2018
- ③ T. Yagi, K. Yamaguchi, N. Takeuchi, K. Yamamura and K. Terada, Development of multi stage failure simulation using the principle of hybrid-type virtual work, The 13th World Congress on Computational Mechanics (WCCM XIII) and 2nd Pan American Congress on Computational Mechanics (PANACM II), Marriot Marquis, New York, USA, July 22-27, 2018
 - ④ Y. Shintaku, S. Tsutsumi and K. Terada, A method for seamless transition from degradation of material stiffness to formation of strong discontinuity, The 13th World Congress on Computational Mechanics (WCCM XIII) and 2nd Pan American Congress on Computational Mechanics (PANACM II), Marriot Marquis, New York, USA, July 22-27, 2018
 - ⑤ M. Kurumatani, Y. Soma, 3D fracture simulation of reinforced concrete using damage model based on fracture mechanics for concrete, 14th U.S. National Congress on Computational Mechanics (USNCCM14), Palais des Congrès de Montréal, QC, Canada, July 17-20, 2017
 - ⑥ K. Terada, S. Moriguchi, S. Suzuki, Y. Yamaguchi, Simulations of multi-stage failure phenomena in slope disaster, 6th European Conference on Computational Mechanics (Solids, Structures and Coupled Problems) (ECCM6) and 7th European Conference on Computational Fluid Dynamics (ECFD 7), Scottish Event Campus, Glasgow, UK, June 11-15, 2018
 - ⑦ 相馬 悠人、車谷 麻緒、損傷モデルによる接触や摩擦すべりを含むひび割れ進展挙動のシミュレーション、第23回計算工学講演会、ウイנקあいち、名古屋、2018年6月6日～8日
 - ⑧ 鈴木 峻、寺田 賢二郎、森口 周二、竹内 則雄、動的接触・大回転を考慮したマルチステージ破壊プロセスの数値解析、第23回計算工学講演会、ウイנקあいち、名古屋、2018年6月6日～8日
 - ⑨ S. Suzuki, K. Terada, N. Takeuchi, S. Moriguchi, S. Takase, Two-stage cohesive failure simulation with co-rotational formulation, 12th World Congress on Computational Mechanics (WCCM XII) and 6th Asia-Pacific Congress on Computational Mechanics (APCOM VI), COEX, Seoul, Korea, July 24-29, 2016
 - ⑩ Y. Shintaku, K. Terada, S. Tsutsumi, Ductile crack propagation analysis by a new cohesive zone model embedded in damage constitutive laws, 12th World Congress on Computational Mechanics (WCCM XII) and 6th Asia-Pacific Congress on Computational Mechanics (APCOM VI), COEX, Seoul, Korea, July 24-29, 2016

6. 研究組織

(1) 研究分担者

研究分担者氏名：森口 周二

ローマ字氏名：(MORIGUCHI, Shuji)

所属研究機関名：東北大学

部局名：災害科学国際研究所

職名：准教授

研究者番号 (8桁)：20447527

研究分担者氏名：高瀬 慎介

ローマ字氏名：(TAKASE, Shinsuke)

所属研究機関名：八戸工業大学

部局名：大学院工学研究科

職名：講師

研究者番号 (8桁)：00748808

研究分担者氏名：加藤 準治

ローマ字氏名：(KATO, Junji)

所属研究機関名：名古屋大学

部局名：大学院工学研究科
職名：教授
研究者番号（8桁）：00594087

研究分担者氏名：京谷 孝史
ローマ字氏名：(KYOYA, Takashi)
所属研究機関名：東北大学
部局名：工学研究科
職名：教授
研究者番号（8桁）：00186347

研究分担者氏名：車谷 麻緒
ローマ字氏名：(KURUMATANI, Mao)
所属研究機関名：茨城大学
部局名：理工学研究科（工学野）
職名：准教授
研究者番号（8桁）：20552392

研究分担者氏名：竹内 則雄
ローマ字氏名：(TAKEUCHI, Norio)
所属研究機関名：法政大学
部局名：デザイン工学部
職名：教授
研究者番号（8桁）：10126112

研究分担者氏名：新宅 勇一
ローマ字氏名：(SHINTAKU, Yuichi)
所属研究機関名：筑波大学
部局名：システム情報系
職名：助教
研究者番号（8桁）：80780064

研究分担者氏名：松原 成志朗
ローマ字氏名：(MATSUBARA, Seishiro)
所属研究機関名：東北大学
部局名：工学研究科
職名：助教
研究者番号（8桁）：40823638

※科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属されます。